ChinaXiv合作期刊

第39卷 第5期
2022年9月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 39 No. 5
Sep. 2022

旱榆幼树对土壤失水及复水的生理响应过程研究

赵子涵[1]， 王树森[1]， 罗于洋[1]， 刘瑞香[1]， 韩 峰[2]， 马迎梅[1]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，荒漠生态系统保护与修复国家林业局重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010010；
2. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院，内蒙古 呼和浩特 010010）

chinaXiv:202212.00148v1

摘 要： 干旱区造林后幼树对土壤水分的生理响应过程对其进行水分管理并决定其成活的重要前提，以旱榆（*Ulmus glaucescens*）幼树为试材，采用盆栽自然失水和复水的方法，研究旱榆幼树形态、生理及光合特性对不同土壤失水程度及复水的响应过程，以期为栽培旱榆的水分管理提供理论依据。结果表明：(1) 在土壤失水较少时（土壤含水量为15%），旱榆叶片相对含水量、叶绿素含量和水分利用效率表现出小幅升高，分别较试验前增加了14.8%、1.2%、43.2%；叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率呈明显下降趋势，分别较试验前降低了26.5%、27.1%、48.7%；(2) 土壤失水量严重时（土壤含水量为0%），旱榆叶片相对含水量、叶绿素含量和水分利用效率大幅下降，分别较试验前下降了78.4%、65.4%、47.3%；叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均表现为缓慢降低，分别较试验前降低了89.9%、83.3%、79.9%；光合速率下降的主要原因之一是气孔导度的变化。(3) 复水可以缓解土壤失水对旱榆的不利影响。因此，在土壤持续失水环境下，旱榆通过一系列形态、生理和光合特性的变化来适应土壤含水量的下降，表现出较强的耐旱性，旱榆栽植后如遇严重土壤失水的情况，复水可以缓解对其造成的危害。

关键词： 旱榆；幼树；土壤失水；形态和生理；光合特性

旱榆是西北干旱地区普遍分布的树种，在速生用材林、经济林、城乡风景林的栽培中占有重要地位[1]。在旱榆栽培管理中，由于我国北方干旱半干旱地区自然条件的限制，旱榆的成活及生长受土壤水分缺失等环境因素的影响[2]。因此，在旱榆幼树栽培中对其进行合理的水分管理是保障其成活，提高造林效率的重要限制因子[3]。目前，国内对旱榆的研究主要集中在嫩枝扦插技术[4]、引种育苗[5]、根系分布[6]与种群结构[7]，通过代谢生理方面分析比较几种榆科植物的抗旱性强弱[8-9]等方面。在旱榆的栽培过程中，旱榆幼树的光合特性与生长、生理指标是其对不同土壤含水量响应的重要体现。研究表明，土壤重度失水或严重干旱胁迫对植物生长、生理和光合作用均有显著影响，表现为基径、株高、叶面积等生长受限[10-11]，叶肉细胞失水，叶绿素合成减弱[12]，光合作用受到抑制等[13-15]。酸枣（*Ziziphus jujuba*）在土壤严重失水时植株生长和叶绿素合成均受到抑制，叶片相对含水量、叶绿素含量减小[12]。紫穗槐（*Amorpha fruticosa*）、旱柳（*Salix matsudana*）等植物随着土壤水分降低，叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、叶绿素含量等都有不同程度的下降[13]。植物通常在土壤水分缺失的环境中能通过各种方式来避开这些胁迫，或通过改变自身来适应不良环境[16]。绵刺（*Potaninia mongolica*）当遇到生长季降水稀少、土壤水分过低时，其叶、花、果实会全部脱落，以假死方式进入休眠，当秋季有降水补给，绵刺会迅速吸水，进行二次生长繁殖[17]。

本文旨在模拟造林成功后，旱榆幼树受土壤水分缺乏无法正常补给而产生的胁迫，及其遇到自然降雨后得到水分补给而进行生长的过程，研究旱榆幼树对土壤水分散失的响应机制，为后期旱榆的优化栽培，保育管理提供理论依据和实践指导。因此，本文选取3 a生旱榆幼树为试验材料，通过在土壤自然失水及复水的情况下，测定其形态、生理及

收稿日期： 2022-02-07； **修订日期：** 2022-04-23
基金项目： 内蒙古农业大学高层次人才引进科研启动项目（NDYB2017-12）；内蒙古自然科学基金（2018BS03003）；自治区科技计划应用研发项目（2019GG004）资助
作者简介： 赵子涵（1997-），女，硕士研究生，主要从事植物逆境生理方面的研究. E-mail: 3037172860@qq.com
通讯作者： 马迎梅. E-mail: mym_youxiang@sina.com

ChinaXiv合作期刊

光合指标来分析该树种在不同土壤含水量下这些指标的变化过程。

1　材料与方法

1.1　供试材料

以2020年秋购置于巴彦淖尔市乌拉特中旗的2 a生旱榆实生树苗为试验材料进行盆栽试验。选用上、下口径及高分别为33 cm、18 cm和22 cm的塑料花盆和沙壤土作为旱榆幼树的盆栽介质。随后置于内蒙古农业大学日光温室内培养半年,保证土壤水分充足,使之不会成为苗木生长的限制因子。于2021年7月选择长势基本一致、生长状况良好的植株就地进行试验。试验开展期间温室内平均温度为27 ℃,空气相对湿度为31%。

1.2　试验设计

于2021年7月27日浇透水后开始试验,通过土壤自然失水的方式形成干旱胁迫。试验各处理(对照处理和干旱处理)重复4次,每个重复4盆,共32盆。试验期间每日采用称重法向对照处理(CK)盆内补充水分,并使土壤含水量保持在36.99%±6.4%;干旱处理于试验开始之日停止浇水处理,在停止浇水的第0 d、6 d、12 d、18 d、24 d和第30 d采样;干旱处理于停止浇水的第30 d下午18:00复水,分别在第32 d和第36 d进行采样,试验共进行36 d。每次试验采集对照处理和干旱处理叶片,每个重复采集顶部第1~5片成熟叶片混匀,取3片新鲜叶片测定叶片相对含水量,剩余叶片放进液氮罐冷藏,带回实验室放入−80 °C冰箱里备用。在每次测定指标的时间,采用美国TDR300土壤水分仪(12 cm探头)进行盆内土壤体积含水量的测定,采用称重法测定盆内蒸腾和蒸发量,并对植物的生长和生理指标进行测定[18]。

1.3　指标测定

1.3.1　形态指标　株高采用卷尺测量每株植物高度,株高生长量通过干旱胁迫结束时的株高减去干旱胁迫开始时株高的方法计算[19]。

茎粗采用记号笔标记每盆测定的位置,每次用游标卡尺在该位置进行测量。地径生长量通过干旱胁迫结束时地径减去干旱胁迫开始时地径的方法计算[19]。

叶面积通过记号笔标记3片叶后,每次用叶面积仪器扫描这些叶片并计算投影面积。叶面积增长量通过干旱胁迫结束时扫描叶面积减去干旱胁迫开始时扫描叶面积的方法计算[19]。

1.3.2　生理指标　叶片相对含水量测定采用饱和水重法。每株植物随机剪取4个叶片,迅速带回实验室,称其鲜重($m1$),共4次重复。随后将叶片浸泡在去离子水中24 h并取其饱和水重($m2$),然后在烘箱内烘干至恒重($m3$)。采用如下的公式计算叶片相对含水量[20]。

$$\text{叶片相对含水量(\%)} = \frac{\text{鲜重}(m1) - \text{干重}(m3)}{\text{饱和水重}(m2) - \text{干重}(m3)} \times 100\% \tag{1}$$

叶片电导率采用电导率比值法。随机选取不同部位的叶片大约500 mg,在离心管中浸入去离子水中震荡24 h,随后使用电导率仪测定初始叶片电导率,将叶片在95 ℃沸水中加热2 h,最后测定最大电导率值。叶片电导率根据以下公式计算[21]:

$$\text{叶片电导率(\%)} = \frac{\text{加热前电导率}}{\text{加热后电导率}} \times 100\% \tag{2}$$

叶绿素总量测定时,将叶片采集后置于二甲基亚砜中浸泡24 h提取叶绿素,用分光光度计测定其在645 nm、663 nm下的吸光值,根据以下公式计算叶绿素含量[21]:

$$\text{叶绿素含量} = (0.00802 \times A663 + 0.0202 \times A645) \times V/W \tag{3}$$

式中:V 为加入二甲基亚砜体积;W 为叶片干重;A 为吸光值。

1.3.3　光合指标　在每次取样的上午9:00—12:00用GFS3000便携式光合仪器测量标记叶片的净光合速率(Pn, $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)、蒸腾速率($Tr$, $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)、胞间$CO_2$浓度($Ci$, $\mu mol \cdot mol^{-1}$)、气孔导度(Gs, $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)、大气环境$CO_2$浓度($Ca$, ppm),并计算水分利用效率($WUE$)和气孔限制值($Ls$),公式如下[22]:

$$WUE = \frac{Pn}{Tr} \tag{4}$$

$$Ls = 1 - \frac{Ci}{Ca} \tag{5}$$

1.4　数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2019进行数据整理,用SPSS Statistics 25对各个指标进行单因素方差分析,指标值采用平均值±标准差的形式,采用Origin 2018进行各指标绘图。

chinaXiv:202212.00148v1

ChinaXiv合作期刊

2 结果与分析

2.1 试验期间花盆内土壤含水量及蒸腾蒸发量的变化趋势

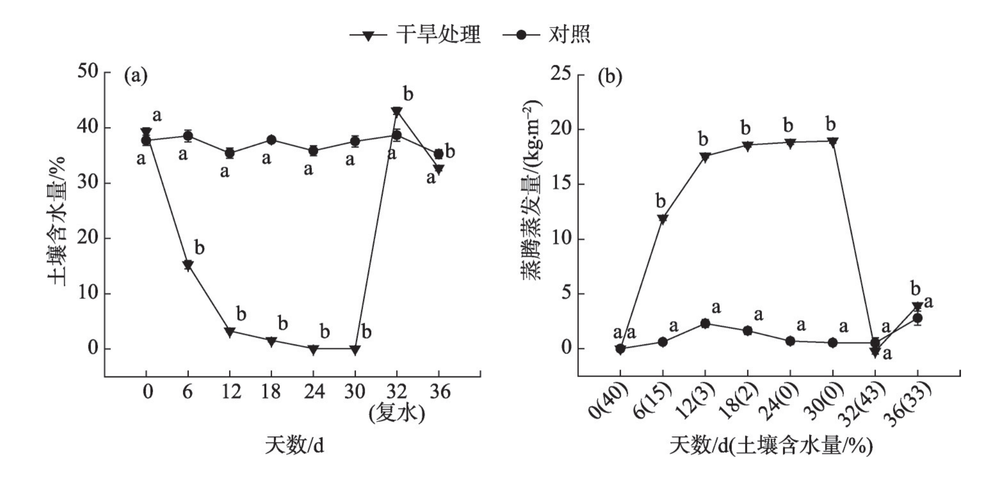
由图1可知，随着土壤失水时间的延长，旱榆幼树盆内土壤含水量逐渐减小，其由40%降至0%(0~24 d)。其中，土壤含水量在第6 d、12 d、18 d与第0 d相比分别显著下降62.5%、92.5%、95%($P<0.01$)。土壤失水至第24 d时，旱榆土壤含水量降至最低(0%)，与处理第0 d相比下降99.7%，与同期CK相比显著($P<0.01$)下降99.7%。当土壤含水量下降至0%后，又维持6 d并进行指标测定且进行复水处理，对照盆内的土壤含水量维持在36.99%±6.4%(图1a)。盆内蒸腾蒸发量随土壤含水量的下降而逐渐增加，由0增至18.9 kg·m^{-2}(0~30 d)。当失水第6 d时，蒸腾蒸发速度最快，蒸腾蒸发量为11.9 kg·m^{-2}。当失水至第12 d后，蒸腾蒸发量趋于平缓。当失水第24 d时，土壤含水量接近0%，蒸腾蒸发量达到最大值(18.9 kg·m^{-2}，图1b)。

2.2 旱榆幼树的形态指标对土壤失水与复水的响应

由图2可知，在土壤自然失水的情况下，旱榆幼树株高、基径的增长量与叶面积均逐渐减少。其中，基径增长量在第6 d与CK无显著差异，在第12 d、18 d、24 d与CK相比分别显著下降127%、154%、217%($P<0.01$)，复水后基径仍持续减小，CK基径增长量呈现稳定增长趋势，增长量平均为0.08 mm·d^{-1}且显著($P<0.01$)高于干旱处理(图2a)；株高增长量在第6 d、12 d与CK无显著差异，在第18 d、24 d和30 d与CK相比分别显著下降283%、241%、255%($P<0.01$)，复水后处理组旱榆株高仍呈减小的趋势(图2b)；叶片投影面积增长量在第6 d、12 d与CK无显著差异，在第18 d、24 d、30 d与CK相比显著降低37.5%、33.5%、35.9%($P<0.05$)，复水后处理组旱榆叶面积仍呈减小的趋势(图2c)；通过旱榆幼树形态拍摄图可以看出，在第12 d、18 d、24 d视觉上明显表现出茎干萎蔫、叶片失水卷曲、叶片凋落的现象(图2f~图2i)。以上结果表明，当土壤含水量小于3%时，会显著抑制旱榆幼树叶片和茎干的生长，且在复水后没有恢复，说明土壤含水量过低会抑制旱榆幼树的生长。

2.3 旱榆幼树生理指标对土壤失水与复水的响应

由图3可知，随着土壤自然失水程度增加，叶片含水量和叶绿素总量呈现下降趋势，其中，叶片相对含水量由82.5%降到15.5%(0~30 d)，在0~6 d与CK无显著差异，在第12 d、18 d、24 d、30 d分别比CK显著下降24.4%、56.2%、81.2%、82.1%($P<0.01$)，复水后叶片相对含水量未增加(图3a)；叶绿素总量由9.36 mg·g^{-1}DW降低到3 mg·g^{-1}DW(0~30 d)，在0~12 d与CK无显著差异，在第18 d、24 d、30 d分别比CK显著下降36.5%、64.5%、67%($P<0.01$)，复水后未出现明显变化(图3b)；叶片电导率随失水时间呈上升趋势，由49%上升至100%(0~30 d)，在0~12 d与CK无显著差异，在第18 d、24 d、30 d分别比CK显著升高55.9%、63.3%、100%($P<$



注：图中小写字母表示相同时期对照处理与干旱胁迫处理旱榆幼树同一指标在$P<0.05$水平上差异显著。下同。

图1 自然失水及复水情况下花盆内土壤水分含量(a)及蒸腾蒸发量(b)的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil water content (b) and evapotranspiration (b) under continuous soil water loss and rehydration

chinaXiv:202212.00148v1

ChinaXiv合作期刊

图2　自然失水及复水情况下旱榆幼树的株高(a)、基茎(b)、叶面积(c)生长量及其形态随土壤失水天数的视觉变化(d~m)

Fig. 2　Visual changes of plant height (a), basal stem (b) and leaf area (c) of *Ulmus glaucescens* saplings under natural water loss and rehydration conditions (d-m)

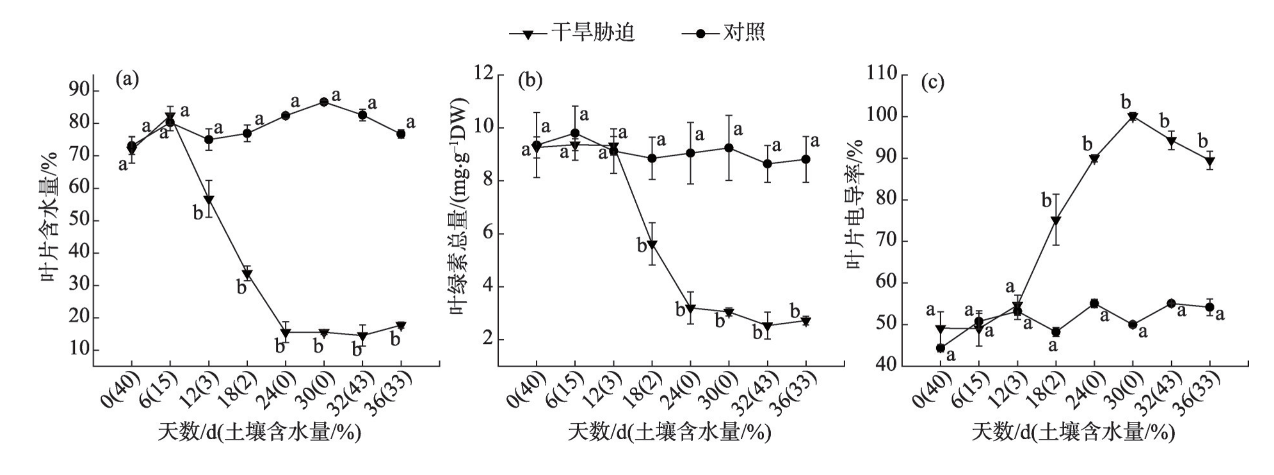


图3　自然失水及复水情况下旱榆幼树的叶片含水量(a)、叶绿素含量(b)和电导率(c)的动态变化

Fig. 3　Dynamic changes of leaf relative water content (a), chlorophyll content (b), and electrolyte leakage (c) for *Ulmus glaucescens* due to soil water loss and rehydration

chinaXiv:202212.00148v1

ChinaXiv合作期刊

0.01)，复水后电导率降低，但仍显著(P<0.01)高于对照处理(图3c)。以上结果表明，随着土壤失水时间延长，干旱胁迫程度增加。当土壤含水量为15%以上时，其对旱榆幼树影响不大(0~6 d)，小于15%和小于3%的土壤含水量对旱榆幼树的叶片组织相对含水量和叶绿素总量有显著的抑制作用。

2.4 旱榆幼树光合指标对土壤失水与复水的响应

由图4可知，随着土壤失水天数的增加，叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度呈持续减小的趋势。其中，光合速率由8.2 μmol·m^{-2}·s^{-1}减小至0.4 μmol·m^{-2}·s^{-1}(0~30 d)，0~6 d与CK不显著，第12 d、18 d、24 d、30 d比CK显著减小58.3%、82.7%、88.4%、94%(P<0.01，图4a)；蒸腾速率由2.4 mmol·m^{-2}·s^{-1}减小至0.1 mmol·m^{-2}·s^{-1}(0~30 d)，0~6 d与CK不显著，第12 d、18 d、24 d、30 d比CK显著减小63%、85.4%、87.1%、95.7%(P<0.01，图4b)；气孔导度由59.8 mmol·m^{-2}·s^{-1}减小至5.9 mmol·m^{-2}·s^{-1}(0~30 d)，0~6 d与CK不显著，第12 d、18 d、24 d、30 d比CK显著减小57.3%、84.3%、87.2%、92.8%(P<0.01，图4c)；胞间CO_2浓度随失水时间的增加呈先下降后上升的趋势，0~12 d呈下降趋势，12~30 d呈上升趋势；由199.5 μmol·mol^{-1}降至144.6 μmol·mol^{-1}又升高至287 μmol·mol^{-1}，与CK相比差异不显著(P>0.05)，复水后(第36 d)比CK差异显著升高46.9%(P<0.01，图4d)。随土壤失水时间的增加，旱榆幼树叶片水分利用效率(WUE)呈先升高后下降再升高的趋势，失水0~6 d呈上升趋势由3.5 μmol·mmol^{-1}升高至5 μmol·mmol^{-1}；6~24 d为下降趋势下降至1.8 μmol·mmol^{-1}，24~30 d为上升趋势又升高至3.4 μmol·mmol^{-1}，与CK相比差异不显著(P>0.05)，复水后CK的WUE持续升高，而土壤失水的处理组则较CK显著下降86%(P<0.01，图4e)；气孔限制值(Ls)随失水时间的增加呈先升高后降低的趋势，0~12 d为上升趋势由54%上升至64%，12~30 d为下降趋势下降至30%，复水前与CK无显著差异(P>0.05)，复水后处理组较CK显著减小76%(P<0.01，图4f)。以上结果表明，当土壤含水量在15%以上(0~6 d)时，其对旱榆幼树的光合作用影响不大，当土壤含水量在15%以下(6~30 d)时，其对旱榆幼树的光合作用具有显著抑制作用。

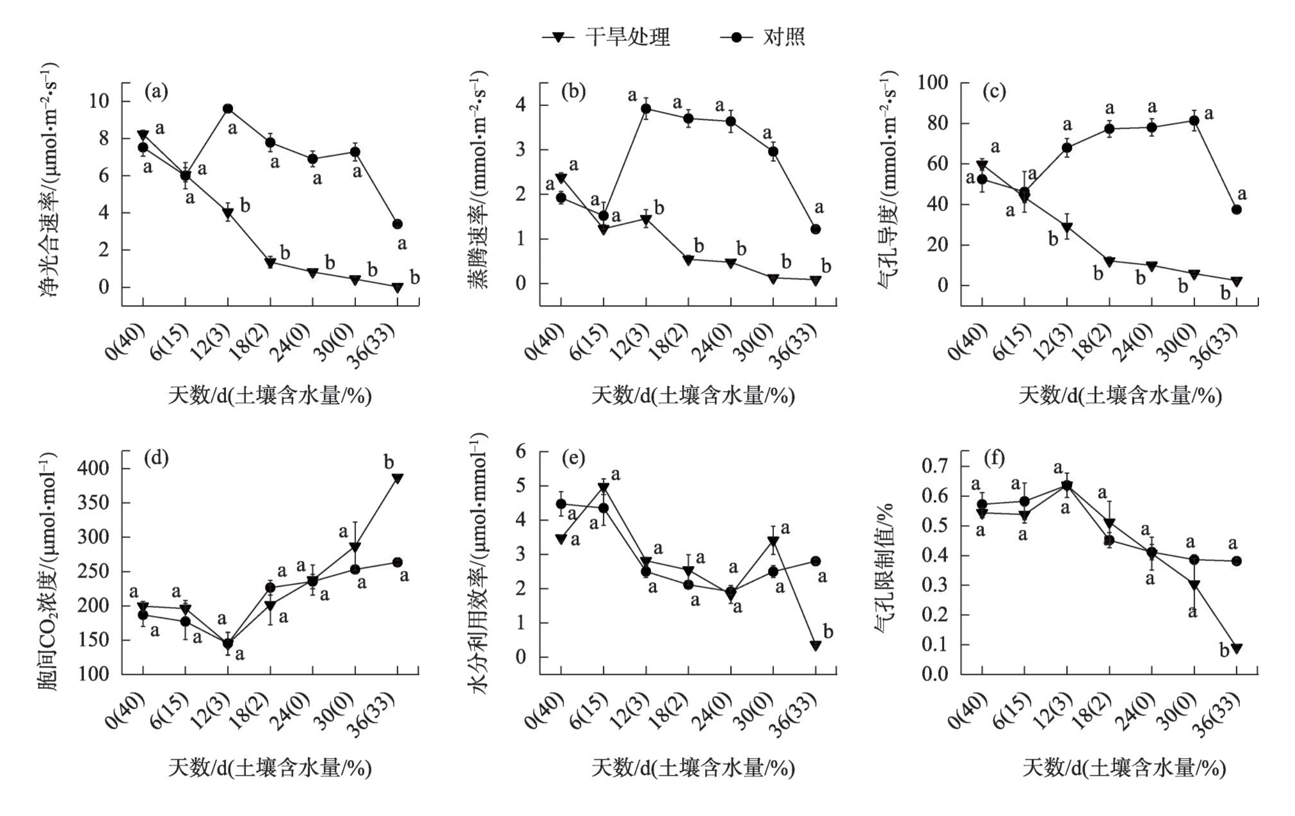


图4 自然失水及复水情况下旱榆幼树的净光合速率(a)、蒸腾速率(b)、气孔导度(c)、胞间CO_2浓度(d)、水分利用效率(e)和气孔限制值(f)的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of net photosynthetic rate (a), transpiration rate (b), stomatal conductance (c), intercellular CO_2 concentration (d), water use efficiency (e) and stomatal limit (f) of *Ulmus glaucescens* due to soil water loss and rehydration

chinaXiv:202212.00148v1

ChinaXiv合作期刊

3 讨 论

土壤水分是影响林木正常生长的重要因素，旱榆幼树干旱试验表明，过低的土壤水分会对旱榆幼树的生长、生理有显著的抑制作用。研究表明，干旱胁迫对植物幼苗叶片的光合和生长产生明显的抑制作用，而且随着干旱胁迫强度和时间的增加，其受抑制程度加重[23-24]。本研究模拟旱榆幼树在其栽培过程中对持续土壤失水及复水的情境，对不同干旱时间和不同土壤含水量的旱榆幼树的生长、生理指标与正常浇水对照处理的指标进行比较。结果显示：在试验中后期土壤含水量小于3%时，会显著抑制旱榆幼树株高、基径和叶面积的生长。当土壤含水量小于15%时，对叶片组织相对含水量和叶绿素总量有显著抑制作用，旱榆幼树形态在视觉上会明显表现出茎干萎蔫、叶片失绿、失水卷曲、叶片下垂、凋落的现象（图2）。且在复水后没有恢复。说明土壤含水量过低会破坏旱榆幼树的生长机制，导致植物生长受阻、组织细胞失水、膨压下降[25]。有研究表明，植物从所有叶片凋亡到植株死亡还有很长一段时间，这个过程中，植株可能因为干旱胁迫而产生休眠现象[2]，而在本文的研究中，当土壤含水量为0%且维持了6 d后，旱榆幼树叶片脱水、萎蔫甚至凋亡。在经历了土壤失水胁迫又复水33 d后，部分旱榆植株重新萌芽（图2k~图2m），这可能是旱榆对极端土壤失水所产生的适应能力。也说明旱榆幼树所有叶片凋落并不一定代表整个植株的死亡，在干旱半干旱区旱榆栽培过程中，为旱榆干旱区造林水分管理奠定了理论基础。因此，在旱榆栽培管理中，如遇上述形态的变化，表明旱榆正在遭受土壤失水或土壤干旱带来的影响，林木管理者应及时对其进行灌溉以免遭受更加严重的胁迫影响。

当植物“身处”土壤水分胁迫环境时，在生理水平上，会对环境产生抵抗。当土壤水分持续减少而产生干旱胁迫时，植物的细胞膜结构会遭到破坏导致其叶片细胞内电解质外渗，植物叶片内已合成的叶绿素将加速分解，表现为叶片叶绿素含量减少，叶片相对电导率增加。本文发现，随土壤失水时间的延长，在干旱胁迫初期（0~12 d）旱榆幼树的叶片电导率与叶绿素含量均与对照处理差别不大，而在中后期叶片相对电导率呈现出显著升高的趋势，叶绿素含量呈现显著下降的趋势（图3），表明旱榆幼树的叶片细胞膜透性和光合细胞器因持续的土壤失水过程发生了改变。这与桑子阳等[26]、王晶英等[27]的研究结果一致。

光合作用是植物最重要的生命活动之一，持续减少的土壤水分含量严重影响植物的光合作用[28]。周宇飞等[29]的研究表明，轻度的干旱胁迫对高粱（*Sorghum bicolor*）造成的影响比较轻微，可通过自身调节来使光合速率不受影响，随着胁迫程度的加强并超出高粱自身的调控能力时，光合速率则大幅降低。本研究发现，持续的土壤失水过程中，土壤含水量大于15%时对旱榆幼树的叶绿素含量和光合作用影响不大；当土壤含水量持续下降小于15%时，旱榆幼树叶片的蒸腾速率，净光合速率、气孔导度也会显著下降。有研究表明，干旱胁迫对植物光合速率的影响可通过气孔限制和非气孔限制的方式反映出来[30]。而本文发现0~12 d的光合速率下降可能是气孔限制引起的，12 d以后土壤含水量降至3%以下，过低的土壤含水量可能损伤了叶片的光合器官，直接导致叶绿体中的光反应过程减弱，使得光合速率下降，胞间CO_2浓度升高，这时的光合速率降低主要为非气孔限制。这与张燕红等[31]、王萍等[15]得出的结论相似。同时，对照处理在胞间CO_2浓度与气孔限制值的差异并不显著，表现为先降低后升高的趋势或是先升高后降低的趋势，这可能和大气环境CO_2浓度不稳定有关。另外，复水可能会逆转这些对旱榆光合作用产生的不利影响。例如，在旱榆栽培过程中，如遇极度土壤干旱并对其产生影响，此时及时的降雨或人工灌溉将会对被逆境影响的旱榆幼树具有重要作用而保障其成活和生长。

4 结 论

（1）旱榆幼树通过减小基径、株高和叶面积，在形态上对持续下降的土壤含水量进行响应，并抵御土壤失水导致的逆境。

（2）旱榆幼树通过降低叶片相对含水量、叶绿素含量和增加叶片电导率在生理水平上对持续的土壤失水进行响应。

（3）旱榆幼树的净光合速率、气孔导度、蒸腾速

chinaXiv:202212.00148v1

ChinaXiv合作期刊

率均因持续减少的土壤含水量而降低。

(4) 旱榆幼树的光合作用减弱在干旱胁迫初期表现为气孔限制,在干旱胁迫中后期表现为非气孔限制。

(5) 土壤含水量小于15%会显著抑制旱榆幼树的生长和光合作用,旱榆幼树对过低的土壤含水量有一定的耐旱性,复水对旱榆幼树的各项指标变化起到促进作用。在自然造林环境中要及时监测土壤含水量进行人工补水,以免破坏旱榆生长。

参考文献(References):

[1] 韦小丽, 朱守谦, 徐锡增. 4个榆科树种水分参数随季节和年龄的变化规律[J]. 山地农业生物学报, 2005, 24(1): 17−21, 47. [Wei Xiaoli, Zhu Shouqian, Xu Xizeng. The change regularity of water parameters in four Ulmaceae trees species with season and age[J]. Journal of Mountain Agricultural and Biology, 2005, 24(1): 17−21, 47.]

[2] 陈志成, 王志伟, 王荣荣, 等. 3种阔叶树种对持续干旱的生理响应及抗旱性评价[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 65−71. [Chen Zhicheng, Wang Zhiwei, Wang Rongrong, et al. Physiological response of three broadleaved tree species to drought stress and evaluation of drought resistance[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(2): 65−71.]

[3] 贺康宁, 张光灿, 田阳, 等. 黄土半干旱区集水造林条件下林木生长适宜的土壤水分环境[J]. 林业科学, 2003, 49(1): 10−16. [He Kangning, Zhang Guangcan, Tian Yang, et al. The suitable soil moisture condition for forest growth in catchment afforestation in semi-arid region on Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 49(1): 10−16.]

[4] 李晓欣, 常金宝, 柴楠. 对4种榆属植物嫩枝扦插生根的初步研究[J]. 现代园艺, 2017, 40(20): 15−16. [Li Xiaoxin, Chang Jinbao, Chai Nan. Preliminary study on softwood cutting rooting of 4 species of *Ulmus*[J]. Xiandai Yuanyi Xiandai Horticulture, 2017, 40 (20): 15−16.]

[5] 倪媛, 刘涛, 倪伟, 等. 内蒙古乌拉特高原旱榆人工育苗试验[J]. 内蒙古林业, 2014, 59(5): 27. [Ni Yuan, Liu Tao, Ni Wei, et al. Experimental study on artificial seedling breeding of *Ulmus pumila* in Ulat Plateau of Inner Mongolia[J]. Inner Mongolia Forestry, 2014, 59(5): 27.]

[6] 李红丽, 董智, 王林, 等. 浑善达克沙地榆树根系分布特征及生物量研究[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(4): 99−105. [Li Hongli, Dong Zhi, Wang Lin, et al. Study on the root distribution characteristic and biomass of *Ulmus pumila* in Hunshandake sands[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(4): 99−105.]

[7] 张志永, 杨晓晖, 张晓, 等. 浑善达克沙地榆树(*Ulmus pumila*)种群结构和动态特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(3): 524−534. [Zhang Zhiyong, Yang Xiaohui, Zhang Xiao, et al. Structure and dynamic characteristics of *Ulmus pumila* population in the Otindag sandy land[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(3): 524−534.]

[8] 夏尚光, 张金池, 梁淑英. 水分胁迫下3种榆树幼苗生理变化与抗旱性的关系[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 51(3): 131−134. [Xia Shangguang, Zhang Jinchi, Liang Shuying. Relationship between drought resistance and physiological change of three elm trees seedling under water stress[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2008, 51(3): 131−134.]

[9] 王凯, 赵成姣, 林婷婷, 等. 水分处理对榆树幼苗不同器官非结构性碳水化合物的影响[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 113−121. [Wang Kai, Zhao Chengjiao, Lin Tingting, et al. Effects of different water treatments on non-structural carbohydrates in different organs of *Ulmus pumila* seedlings in the Horqin sandy land[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 113−121.]

[10] 刘洋, 王娟, 白婷玉, 等. 4种园林植物幼苗对干旱胁迫的生长和生理响应[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(4): 173−179. [Liu Yang, Wang Juan, Bai Tingyu, et al. Growth and physiological response of seedlings of four garden plants to drought stress[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(4): 173−179.]

[11] 井大炜, 邢尚军, 杜振宇, 等. 干旱胁迫对杨树幼苗生长、光合特性及活性氧代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1809−1816. [Jing Dawei, Xing Shangjun, Du Zhenyu, et al. Effects of drought stress on growth, photosynthetic characteristics, and active oxygen metabolism of poplar seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7): 1809−1816.]

[12] 贺少轩, 梁宗锁, 蔚丽珍, 等. 土壤干旱对2个种源野生酸枣幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(7): 1387−1393. [He Shaoxuan, Liang Zongsuo, Wei Lizhen, et al. Growth and physiological characteristics of wild sour jujube seedlings from two provenances under soil water stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(7): 1387−1393.]

[13] 王强, 陈存根, 钱红格, 等. 水分胁迫对6种苗木光合生理特性的影响[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2): 144−149. [Wang Qiang, Chen Cungen, Qian Hongge, et al. Effects of water stress on photosynthetic characteristics of six sorts of seedlings[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(2): 144−149.]

[14] 邬佳宝, 马明科, 张刚, 等. 文冠果对干旱胁迫的光合生理响应[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 55−60. [Wu Jiabao, Ma Mingke, Zhang Gang, et al. Photosynthetic physiological responses of *Xanthocorpa sorbifolia* under drought stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(5): 55−60.]

[15] 王萍, 张希吏, 石磊. 干旱胁迫下沙芥幼苗叶片光合特性和叶绿素荧光参数的变化[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 159−163. [Wang Ping, Zhang Xili, Shi Lei. Changes of photosynthetic phaacteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Pugionium cornutum*(L.) Gaertn seedlings leaf under drought stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(3): 159−163.]

chinaXiv:202212.00148v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202212.00148v1

[16] 安玉艳, 梁宗锁. 植物应对干旱胁迫的阶段性策略[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2907−2915. [An Yuyan, Liang Zongsuo. Staged strategy of plants in response to drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2907−2915.]

[17] 陶彦彤, 马娟, 张颖娟. 西鄂尔多斯珍稀植物绵刺的避旱相关基因研究[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学版), 2021, 50(3): 226−233. [Tao Yantong, Ma Juan, Zhang Yingjuan. Study on drought avoidance associated genes in rare plant *Potaninia monfolica* in western ordos[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 201, 50(3): 226−233.]

[18] 陈海涛, 房川, 冀晓娜, 等. TDR300在测量土壤水分中的应用[J]. 生命科学仪器, 2007, 5(10): 51−52. [Chen Haitao, Fang Chuan, Ji Xiaona, et al. Application of TDR300 measuring soil moisture[J]. Life Science Instruments, 2007, 5(10): 51−52.]

[19] 尹丽, 胡庭兴, 刘永安, 等. 干旱胁迫对不同施氮水平麻疯树幼苗光合特性及生长的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 569−576. [Yin Li, Hu Tingxing, Liu Yongan, et al. Effect of drought dtress on photosynthetic characteristics and growth of *Jatropha curcas* seedlings under different nitrogen levels[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(3): 569−576.]

[20] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 3−4. [Zhang Zhiliang. Plant Physiology Experimental Guidance[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 3−4.]

[21] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 96−134. [Li Hesheng, Sun Qun, Zhao Shijie, et al. Plant Physiological and Biochemical Principles and Experimental Techniques[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 96−134.]

[22] Fischer R A, Turner N C. Plant productivity in the arid and semiarid zones[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1978, 29(6): 178, doi: 10.1146/annurev.pp.29.060178.001425.

[23] 李强, 曹建华, 余龙江, 等. 干旱胁迫过程中外源钙对忍冬光合生理的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2291−2296. [Li Qiang, Cao Jianhua, Yu Longjiang, et al. Effect of exogenous calcium on the photosynthetic characteristics of *Lonicera japonica* Thunb under drought stress[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(10): 2291−2296.]

[24] 杨斌, 彭长辉, 张贤, 等. 干旱胁迫对刺槐幼苗叶片氮含量、光合速率及非结构性碳水化合物的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(6): 1261−1269. [Yang Bin, Peng Changhui, Zhang Xian, et al. Effects of drought stress on leaf nitrogen content, rate of photosynthesis, and non-structural carbohydrates in *Robinia pseudo-acacia* L. seedlings[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(6): 1261−1269.]

[25] 吴金山, 张景欢, 李瑞杰, 等. 植物对干旱胁迫的生理机制及适应性研究进展[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2017, 37(6): 452−456. [Wu Jinshan, Zhang Jinghuan, Li Ruijie, et al. The plant's physiological mechanism and adaptability to drought stress [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 37(6): 452−456.]

[26] 桑子阳, 马履一, 陈发菊. 干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(1): 109−115. [Sang Ziyang, Ma Lvyi, Chen Faju. Growth and physiological characteristics of *Magnolia wufengensis* seedlings under drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(1): 109−115.]

[27] 王晶英, 赵雨森, 王臻, 等. 干旱胁迫对银中杨生理生化特性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 197−200. [Wang Jingying, Zhao Yusen, Wang Zhen, et al. Effect of drought stress on physiologic and biochemical characteristic of *Populus alba* × *Populus berolinensis*[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20 (1): 197−200.]

[28] 韩刚, 赵忠. 不同土壤水分下4种沙生灌木的光合光响应特性[J].生态学报, 2010, 30(15): 4019−4026. [Han Gang, Zhao Zhong. Light response characteristics of photosynthesis of four xerophilous shrubs under different soil moistures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 4019−4026.]

[29] 周宇飞, 王德权, 陆樟镳, 等. 干旱胁迫对持绿性高粱光合特性和内源激素ABA、CTK含量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47 (4): 655−663. [Zhou Yufei, Wang Dequan, Lu Zhangbing, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and endogenous hormone ABA and CTK contents in green-stayed *Sorghum* [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(4): 655−663.]

[30] 付士磊, 周永斌, 何兴元, 等. 干旱胁迫对杨树光合生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2016−2019. [Fu Shilei, Zhou Yongbin, He Xingyuan, et al. Effects of drought stress on photosynthesis physiology of *Populus pseudo-simonii*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(11): 2016−2019.]

[31] 张燕红, 吴永波, 刘璇, 等. 高温和干旱胁迫对杨树幼苗光合性能和抗氧化酶系统的影响[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45 (11): 32−38. [Zhang Yanhong, Wu Yongbo, Liu Xuan, et al. Effects of elevated temperature and drought on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme system of *Poplar* seedlings[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, 45(11): 32−38.]

ChinaXiv合作期刊

Physiological responses of a young Gansu elm (*Ulmus glaucescens*) to soil water loss and rehydration

ZHAO Zihan[1], WANG Shusen[1], LUO Yuyang[1], LIU Ruixiang[1],
HAN Feng[2], MA Yingmei[1]

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Key Laboratory of Desert Ecosystem Restoration and Protection, Hohhot 010011, Inner Mongolia, China; 2. College of Grassland and Environmental Resources, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, Inner Mongolia, China)

Abstract: The physiological responses of young trees to soil water after afforestation in arid areas are important factors in water management and their survival. To provide a theoretical basis for water management in the cultivation of Gansu elm trees (*Ulmus glaucescens*), we analyzed the responses of morphology, physiology, and photosynthetic characteristics of young Gansu elm trees to different degrees of soil water loss and rehydration by using the potted method under mimicking natural water loss and rehydration conditions. The results showed that relative water content, chlorophyll content, and water use efficiency of Gansu elm leaves increased slightly by 14.8%, 1.2%, and 43.2%, respectively when the soil water loss was less (15%). The net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate of leaves decreased significantly by 26.5%, 27.1%, and 48.7%, respectively. When soil water content was at its lowest point (0%), the relative water content, chlorophyll content, and water use efficiency of Gansu elm leaves decreased significantly that the relative water content decreased by 78.4%, 65.4%, and 47.3%, respectively. There was a gradual decrease in the net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration, by the values of 89.9%, 83.3%, and 79.9% which were lower than the corresponding rates before soil water loss. One of the main reasons for the decline in the photosynthetic rate was the change in stomatal conductance. Rehydration can alleviate the adverse effects caused by soil water loss in Gansu elm. Therefore, in the environment of continuous soil water loss, Gansu elm adapts to the decline of soil water content through a series of changes in morphology, physiology, and photosynthetic characteristics by showing strong drought tolerance. In the case of severe soil water loss after planting, rehydration can alleviate the damage to Gansu elm trees.

Keywords: *Ulmus glaucescens*; young trees; soil water loss; morphological and physiological characteristics; photosynthetic characteristics

chinaXiv:202212.00148v1